

**寒地先端材料研究所所有の携帯型成分分析計・硬さ計の被災建物への適用性****Applicability to Damaged Buildings on Handheld X-ray Fluorescence Spectrometer and Ultrasonic Hardness Tester owned by LAM**

田沼 吉伸\*

齋藤 繁\*\*

前田 憲太郎\*

Yoshinobu Tanuma

Shigeru Saito

Kentarou Maeda

**概要**

自然災害等で被災した建築物の被害分析調査や耐震診断では、使用材料の性能評価確認が不可欠で、設計図書が残されている場合には、それに基づく評価が行われている。ただし、過去の被害調査結果では、設計図書が残されていない場合や設計図書との整合性が疑われる場合もあり、このような場合には現地調査による確認が不可欠で、携帯型装置による分析が有効となる。本報告では、寒地先端材料研究所が所有する携帯型成分分析計と硬さ計それぞれについて、各種鋼材へ適用した際の測定誤差を含む使用上の留意点について、実測例を基に提示することを目的としている。

**1. はじめに**

既存鉄骨建物の耐震診断や地震・強風・豪雪等による被災後の建物の調査、腐食損傷建物の調査では、各種使用材料の確認が必要になる。更に、損傷建物の設計・施工図書が残されている場合でも、各種損傷評価に関しては、厳密には、それらの記載事項の信憑性を評価<sup>(1)</sup>する必要がある。

本報告では、既存使用建物を想定すると、携帯型装置のみ使用可能なことから、寒地先端材料研究所所有の蛍光X線による携帯型成分分析計と携帯型硬さ計を用いて実施した各種測定結果について報告する。既存建物では経年劣化に伴い材料の表面状態が均一では無いことや荷重・外力によって変形した材料も対象とすることから、測定誤差が大きくなることが予想される。したがって、本報告では各種鋼材等の測定誤差の縮小に主眼を置いている。

**2. 本報告で扱う測定装置****2.1 携帯型成分分析計**

使用する測定機器は本学所有の(株)リガク製であるが、鋼材に含まれる炭素含有量は測定できない。腐食被害を受けた既存建築物の屋根面の測定結果と測定誤差を検証するために土台を使い試験体を浮かすように設置して測定した室内での測定結果

を後述する。

**2.2 携帯型硬さ計**

使用する測定機器は本学所有のJFEアドバンテック株式会社製の携帯硬さ計である。測定結果の検討は、ミルシートや素材試験結果による引張強さとの関連に基づき行った。

**3. 携帯型成分分析装置の実測例****3.1 腐食した屋根面の測定結果**

A牧場の堆肥発酵舎が竣工後9年程度で屋根材に局所的な孔食が生じた。建築概要は建築面積3298.99m<sup>2</sup>、軒高7.35m、最高高さ:12.915m、スパン43.15m、桁行長さ75.1m(柱芯間)であり、構造は鉄骨造平屋建てで越屋根部を換気(モニター)仕様としている。屋根材は設計図書では、塗装溶融55%アルミニウム亜鉛合金メッキ鋼板(JIS G 3322 t=0.8mm)を折板として用いている。なお、使用材料原板は溶融55%アルミニウム亜鉛合金メッキ鋼板(JIS G 3321)であり、メッキ浴における標準組成は質量分率で約55%アルミニウム、1.6%珪素、残部亜鉛と規定されている。屋根実材と設計仕様材料との整合性を確認するため現地調査を行った。屋根材の成分分析は屋根材表面と裏面について行った。表裏いずれの面も表面の塗装面を研磨し、素材を露出させて測定し

\* 北海道科学大学寒地先端材料研究所 工学部建築学科

\*\* 北海道科学大学寒地先端材料研究所 工学部機械工学科

た部分と直接表面から測定した部分がある。研磨は表面をサンドペーパーで磨いただけである。なお、建物を使用した状態での計測であり、屋根裏面は、作業車が入れる空間が少なく、測定箇所は5箇所であり、屋根表面は22箇所である。各成分の質量分率(wt%)の総計が94%以上測定できたものを有効とした時の計測箇所数は次の通りである。

1) 屋根表面：研磨面：12箇所、直接面：5箇所

2) 屋根裏面：研磨面：3箇所、直接面：2箇所

屋根表面では5箇所の計測が不能であったが、これらの位置は、主に屋根裏に配置されている繋ぎ小梁間で、若干の変形により、平面性が保たれていない箇所である。また、測定時間は15秒～21秒程度であったが、この違いによる測定不能性への影響は確認出来なかった。表1には、測定箇所数の多い、屋根表面の研磨面、直接面の測定結果を示す。表1中に示す研磨面の測定結果では直接面に比べて、ばらつきが大きい傾向にある。これは、研磨の深さによって、成分比率が異なったことによるものと考えられる。ただし、直接測定した場合には塗料に含有していると考えられる珪素(Si)や亜鉛成分比率が相対的に大きくなると考えられ、屋根鋼板のメッキ成分の検証に当たり、研磨面の測定結果から推定する。Siは鋼材成分の中にも微量が含まれていると考えられるが、表1中の研磨面の測定結果のメッキの規定3元素の平均値の和でそれぞれの成分比率を算

定すると次の値となる。

$Al+Zn+Si=45.518\%$

アルミニウムの比率：60.20%

亜鉛の比率：37.20%

珪素の比率：2.59%

屋根裏面の研磨面(3箇所)の測定結果は下記の値となる。

$Al+Zn+Si=50.815\%$

アルミニウムの比率

$=28.77/50.815 \times 100=56.62\%$

亜鉛の比率

$=21.473/50.815 \times 100=42.26\%$

珪素の比率

$=0.572/50.815 \times 100=1.13\%$

屋根表裏研磨面の平均値は、アルミニウム58.41%、亜鉛39.73%、珪素1.86%となり、測定誤差の影響を考えると、使用した屋根材は規格材であると推定できた。

### 3.2 鋼材成分の測定誤差に関する検討

前節の検討結果から、測定値にはばらつきが生じることが明らかで、機器の特性把握のために、溶接部を含む各種試験材を対象に測定を行った。

#### 3.2.1 測定試験材

対象とした試験材は、母材にSS400、SN400B、SN490B材を用いて中央部をCO<sub>2</sub>半自動溶接による裏当金を用いた完全溶け込み溶接接合したAシリーズと

表1 腐食被害を受けた屋根面表面の測定結果

記号	成分名	研磨面			直接面		
		測定割合	平均値	標準偏差	測定割合	平均値	標準偏差
Si	珪素	12/12	1.181	0.143	5/5	4.378	1.110
Zn	亜鉛	12/12	16.933	4.505	5/5	33.654	1.208
Co	コバルト	12/12	1.422	0.102	5/5	1.496	0.068
Cu	銅	12/12	0.104	0.054	5/5	0.202	0.016
Fe	鉄	12/12	51.995	5.257	5/5	34.482	2.474
Mn	マンガン	12/12	0.388	0.037	5/5	0.242	0.014
Al	アルミニウム	12/12	27.404	1.823	5/5	23.726	2.257
S	硫黄	0/12	—	—	3/5	0.283	0.050
Ti	チタン	0/12	—	—	4/5	0.495	0.097
Cr	クロム	3/12	0.023	0.018	4/5	0.509	0.073
Ru	ルテニウム	7/12	0.004	<0.001	5/5	0.006	<0.001
Mo	モリブデン	3/12	<0.001	<0.001	0/5	—	—
Zr	ジルコニウム	0/12	—	—	4/5	0.048	0.011
Bi	ビスマス	11/12	0.017	0.004	5/5	0.013	0.004
Nb	ニオブ	2/12	0.003	<0.001	4/5	0.004	<0.001
V	バナジウム	0/12	—	—	3/5	0.084	0.066
P	リン	0/12	—	—	2/5	0.327	0.020

母材を鋼材(軟鋼・鋼管)およびステンレス鋼材およびステンレス鋼管を用いた B シリーズを用意した。B シリーズの溶接法は、鋼材は被覆アーク溶接、CO<sub>2</sub> 半自動溶接および ティグ溶接とし、ステンレス鋼はティグ溶接、ミグ溶接および被覆アーク溶接とした。両シリーズ共に、試験材は溶接線と直交方向に切断している。測定は、母材の表裏面および切断側面、溶接部の表面(一部表裏面)および切断側面について行った。各シリーズの試験材の概要と初期測定時および表面研磨後の試験材の例をそれぞれ表 2、3 および写真 1、2 に示す。初期測定時には、表面無処理のまま測定を行ったが、初期測定終了後に、同一測定箇所をグラインダー処理後、サンドペーパーで研磨し、再測定を行った。測定変数は鋼種、板厚、開先形状、測定位置、表面の研磨の有無のほかに、測定時間(10、20、30 秒)とした。

### 3.2.2 測定結果

使用機器の合金元素の仕様書上の測定時間(t)と

に含まれる珪素(Si)、硫黄(S)、磷(P)については、測定時間に拘わらず、正確な測定値は得られない場合が多かった。これは、鋼材の成分上限値が低いためと考えられる。以下では、主要 5 元素の内、全ての試験体で測定できたマンガン(Mn)についての測定結果を示す。図 1(a)、(b)には、A シリーズの SS400 材を用いた試験材 No. 1、2 および SN400B 材を用いた試験材 No. 3、4 についての測定結果を示す。なお、図中の縦軸  $\alpha$  は各測定値をそれぞれの鋼種の測定平均値で除した値としている。図を見ると、測定位置によって、測定値にばらつきが生じることと測定時間が 10 秒の場合には、ばらつきが大きく、10%を超える測定誤差が生じている。図 1(a)に示す SS400 材の場合には測定時間が 20 秒の場合が、図 1(b)に示す SN400B 材の場合には、測定時間が 30 秒の場合が最もばらつきが小さく、測定誤差は 5~6%程度となる。表 4 には、初期測定時と研磨後の Mn 含有量の測定範囲と平均値について示す。なお、SN400B



(a) A シリーズの試験材 No.3 の表面



(b) A シリーズの試験材 No.3 の側面



(c) A シリーズの試験材 No.3 の研磨後の表面



(c) A シリーズの試験材 No.3 の研磨後の側面  
写真 1 A シリーズ試験材の例  
(測定位置は写真中の○印位置)

表 2 A シリーズ 試験材の概要

No.	鋼種	板厚 (mm)	開先形状
1	SS400	9	レ形
2	SS400	9	V形
3	SN400B	19	V形
4	SN400B	19	レ形
5	SN490B	9	レ形

しては、15~20 秒程度とされているが、各鋼材成分



(i) No. 3 : 被覆アーク溶接 (ii) No. 11 : ティグ溶接  
(a) B シリーズの試験材表面の例



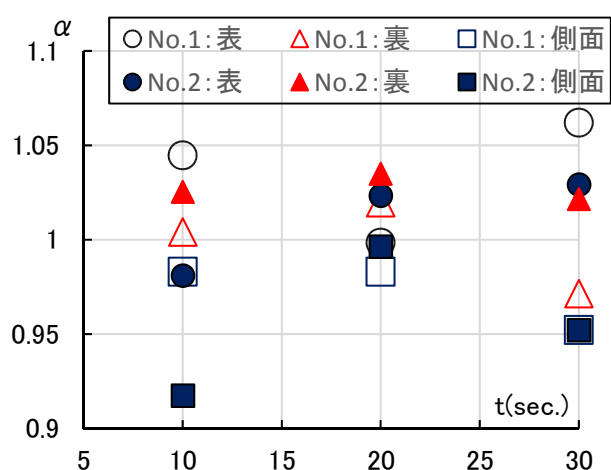
(b) B シリーズの試験材研磨後の表面の例

写真 2 B シリーズ試験材の例  
(測定位置は写真中の○印位置)

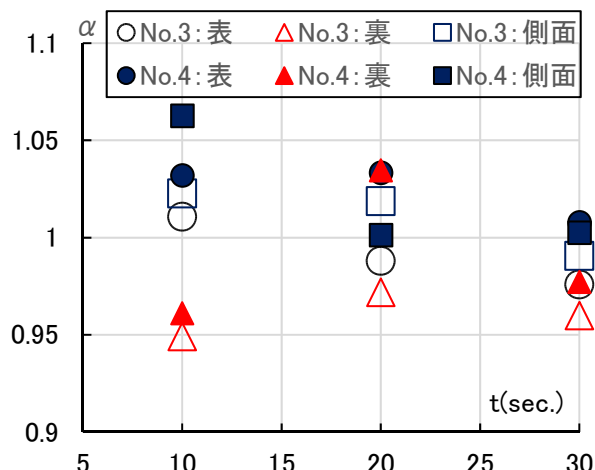
表 3 B シリーズ試験体の概要

No.	鋼種	板厚 (mm)	溶接法	裏当金
1	SS400	3.2	ティグ	無し
2	SS400	9	被覆アーク	無し
3	SS400	9	被覆アーク	有り
4	SS400	9	CO <sub>2</sub> 半自動	無し
5	SS400	9	CO <sub>2</sub> 半自動	有り
6	SS400	19	CO <sub>2</sub> 半自動	有り
7(鋼管)	STKM14A	11	CO <sub>2</sub> 半自動	有り
8(鋼管)	STKM14A	11	被覆アーク	無し
9(鋼管)	STKM14A	4.9	ティグ	無し
10(鋼管)	STKM14A	20	CO <sub>2</sub> 半自動	有り
11(ステンレス)	SUS304	3	ティグ	無し
12(ステンレス)	SUS304	9	ミグ	有り
13(ステンレス)	SUS304	9	ミグ	無し
14(ステンレス)	SUS304TP	11	被覆アーク	無し
15(ステンレス)	SUS304TP	3	ティグ	無し

材と SN490B 材は、Mn 含有量に関する規定を全ての



(a) SS400 材



(b) SN400B 材

図1 Aシリーズ試験材の Mn 含有量に及ぼす測定時間の影響

表4 Aシリーズ母材の Mn 含有量の測定結果(単位:%)

SS400	範囲	平均値
初期測定	0.476~0.551	0.519
研磨後	0.457~0.529	0.500
SN400B	範囲	平均値
初期測定	0.710~0.795	0.748
研磨後	0.701~0.767	0.731
SN490B	範囲	平均値
初期測定	1.478~1.556	1.514
研磨後	1.478~1.557	1.514

表6 Bシリーズのステンレス鋼材溶接部の測定結果(下段が研磨後)

No.	Si (%)	Mn (%)	Ni (%)	Cr (%)	Mo (%)	Cu (%)
12	0.350	1.132	10.727	20.443	0.158	-
	0.627	1.046	10.239	20.242	0.164	0.204
13	0.546	1.102	10.847	19.875	0.156	-
	0.633	1.139	10.324	20.010	0.166	0.231
11	0.322	0.969	8.324	18.950	0.203	0.096
	0.484	1.141	8.297	18.930	0.182	0.323
15	0.375	1.226	9.927	19.106	0.114	-
	0.415	1.403	8.698	18.943	0.117	0.237
JIS	0.65以下	1~2.5	9~11	19.5~22	0.75以下	0.75以下

表5 Bシリーズのステンレス鋼母材の測定結果

試験材No.	t (sec.)	Cr (%)	Ni (%)	Mn (%)
No. 11 下段が研 磨	20	18.894	8.438	1.101
	30	19.003	8.377	1.020
	20	18.464	7.780	1.226
	30	18.401	7.843	0.979
No. 12 下段が研 磨	20	18.796	8.327	1.011
	30	18.796	8.427	0.774
	20	17.925	7.784	1.003
	30	18.621	7.740	0.851
No. 13 下段が研 磨	20	18.797	8.257	0.969
	30	18.580	8.237	0.787
	20	18.565	7.799	0.985
	30	18.438	7.788	0.839
JIS (SUS304)		(18~20)	(8~10.5)	(2以下)

の測定結果が満たしている。表を見ると、SS400 材と SN400B 材では研磨後に値が低下している傾向が見られた。SN490B 材は、測定範囲、平均値共に同一値となっているが、個々の測定値は異なっており、最大、最小値も初期測定時と研磨後では異なる測定結果となっている。表5には、クロム(Cr)、ニッケル(Ni)の含有量の多いBシリーズのステンレス鋼板

表7 Aシリーズの測定差の大きい溶接部の測定結果

No.	測定面	Si (%)	Mn (%)	Ti (%)
1	表面	3.564	4.381	1.797
	側面	0.570	1.116	0.067
2	表面	5.293	5.470	2.302
	側面	0.360	1.124	0.063
1	表面(研磨)	-	1.161	0.066
	側面(研磨)	-	1.115	0.067
2	表面(研磨)	1.846	2.267	0.859
	側面(研磨)	0.050	1.118	0.060
JIS (YGW11)		0.55~1.10	1.40~1.90	0.30以下

(No. 11~13)の初期測定時と研磨後の表面の測定結果の比較を測定時間 20, 30 秒について示す。表中の脚注は、SUS304 材の JIS の成分量の既定値である。表を見ると、Cr, Ni 共に、研磨後の測定値が小さくなる傾向にあり、研磨後の Ni の成分量は全て JIS 規定を満たしていない。これは、ステンレス鋼の場合には、鋼材の黒皮等が無い場合、研磨後の表面の粗さによる影響も考えられる。初期測定時には、B シリーズの各試験体共に JIS の規定値を満たす値となっている。なお、Mn については、研磨の有無に拘わらず、測定時間が 20 秒よりも 30 秒の方が測定値



は低くなっている。表 6 には、B シリーズのステンレス鋼溶接部表面の測定結果について示す。測定時間は 30 秒の値である。なお、A シリーズでは 初期測定では全試験材共に溶接部は溶接のままであるが、B シリーズでは写真 2(a) に示したように余盛部を機械加工により荒削りしている。表中の脚注は、JIS Z 3321 のティグ溶接用鋼棒及び溶接ワイヤの規格で YS308 に該当する値であるが、実際の溶接は他の規格を用いた可能性も有り、参考値である。表を見ると、ステンレスでは、Si の値は多く測定されているが、初期測定時に比べて研磨後の値が高い傾向にあり、これは、母材部でも同様であった。また、銅(Cu)成分は、研磨後に測定可能となった試験材が 3 体あった。A シリーズで、現在の建築鉄骨での主流の溶接法である CO<sub>2</sub> 半自動溶接を用いた試験材で、表面と切断側面の測定値の測定差が大きかった No. 1, 2 の結果を表 7 に示す。表中には、特に測定差が顕著な成分として、Si, Mn, Ti を示している。脚注は、使用した溶接ワイヤである YGW11 の規格値である。表を見ると、両試験材共に表面の初期測定値が切断側面の測定値に比べて、かなり高い値となっている。これは、溶接表面が溶接のままの状態であるために、スラグ等の付着を測定時に除去できなかった影響が考えられる。研磨後の値は、No. 2 の試験材では測定差は大きいですが、初期測定時に比べて、表面と側面の測定差は小さくなっている。

#### 4. 携帯型硬さ計による実測例

##### 4.1 測定試験材

対象とした試験材シリーズ 1 は 9 体で、写真 3-1

～3 に示す。これらは、施工中に倒壊した建物の部材を現場でガス切断して搬入したもので、写真 3-1 (試験材 No. 1～4) の部材は大変形していたため、搬入後、更に小さく切断している。測定は全試験材について、写真 3-1 中に示すように、研磨前後の測定を行った。写真 3-2 は鋼管割り込み板溶接部で、鋼管表面(試験材 No. 5)と割り込み板側面(試験材 No. 6)の測定を行った。写真 3-3(試験材 No. 7～9)は溶接接合されていたプレートである。なお、施工時の各部材のミルシート値から、各部材の引張強さ( $\sigma_u$ )は推定できる。試験材シリーズ 2 は 8 体で、各種実験で使用した試験体の残材であり、素材試験結果から、引張強さ( $\sigma_u$ )は既知である。写真 3 の被災部材に比べて、未使用材か、弾性範囲の加力部位を対象とした(写真 4-1, 2 の例を参照)。シリーズ 1, シリーズ 2 の試験材概要を表 8, 9 にそれぞれ示す。測定変数は、測定位置、変形の程度、母材鋼種および溶接部の有無、形鋼の種類とサイズ、塗装や黒皮のままの測定と研磨後の測定、硬さ測定スタンドの使用の有無である。

##### 4.2 測定方法

試験材シリーズ 1, シリーズ 2 共に、表面無処理のままと複数の方法による研磨後の測定を行った。測定は、試験体毎に 1～複数位置を 5 回ずつ測定した。写真 3-1～3-3 に示した倒壊した建物を除き、既存使用建物の耐震診断や部分的な損傷や腐食被害の場合には、可能な限り軽微な研磨で済ませることが望ましいと考えられる。表面処理の違いによる相対比較のため、表面無処理のままの測定では、塗装面や腐食、黒皮等の上をアセトンで拭き、そのま



(a) 表面無処理



(b) 表面研磨後

写真 3-1 シリーズ 1 の試験材 (No. 1～4) : H-250×250×9×14 (SM490A)



(a) 表面無処理 (No. 5) (b) 表面研磨後 (No. 5) (c) 研磨後の割り込み板 (No. 6)

写真 3-2 シリーズ 1 の試験材 (No.5 : P-216.3×5.8(STKN490B), No.6:PL-16(SM490A))



写真 4-1 シリーズ 2 の試験材の例 (No.4): PL-19(SM490B)

上段が表面、下段が側面で完全溶け込み溶接部を含む測定を実施

写真 3-3 シリーズ 1 の試験材  
(No.7~9): PL-25(SM490A)

写真 4-2 シリーズ 2 の試験材の例 (No.8): PL-9(SS400)  
上段が表面研磨面、下段が側面

ま測定を行った。シリーズ 1 では、変形の大きい部分をなるべく避け測定を行った。研磨方法は、現場での作業を想定して、グラインダー、サンドペーパーを使用することとした。グラインダーはなるべく表面の塗装面や腐食、黒皮等の部分だけを削るようにし、平らに削る場合でも、鋼材部分の研磨は最小限に抑えて行った。サンドペーパーは、粗さの異なる 4 種類 (#40, 120, 800, 1500) を用意し、指や当て板を使用して研磨を行った。研磨方法の種類として、グラインダーのみで研磨したもの、サンドペーパーのみで研磨したもの、グラインダーで研磨後にサンドペーパーで研磨したものとした。切断側面にも、凹凸や錆が見られたので、グラインダーで研磨後、サンドペーパーで研磨してから測定を行った。写真 4-1 の試験材側面は、溶接部中心から左右に 2.5 mm 間隔ごとに測定を行った。

#### 4.3 測定結果

測定結果の整理に当たり、表 8, 9 中の各鋼材の引張強さ ( $\sigma_u$ : 単位 N/mm<sup>2</sup>) から、ビッカース硬さ (HV) の推定値 (HVC) を次式で算定している。

表 8 シリーズ 1 の試験材概要

No.	鋼材	鋼種
1~4	H-250×250×9×14	SM490A
5	P-216.3×5.8	STKN490B
6	PL-16	SM490A
7~9	PL-25	SM490A

表 9 シリーズ 2 の試験材概要

No.	鋼材	鋼種
1	H-350×175×7×11	SS400
2	PL-6	SS400
3	H-200×100×5.5×8	SS400
4	PL-19 (F. P. 含む)	SS400
5	PL-19 (F. P. 含む)	SN490B
6	PL-9 (F. P. 含む)	SS400
7	PL-9 (F. P. 含む)	SN490B
8	PL-9 (隅肉溶接含む)	SS400

(注) F. P. : 完全溶け込み溶接部

$$HVC \doteq (3/9.8) \sigma_u \quad \dots (1)$$

#### 4.3.1 シリーズ 1

図 2 には、シリーズ 1 の No. 1~4 及び No. 7~9 の試験材の測定結果を示す。図中、縦軸 m/c は 5 回の





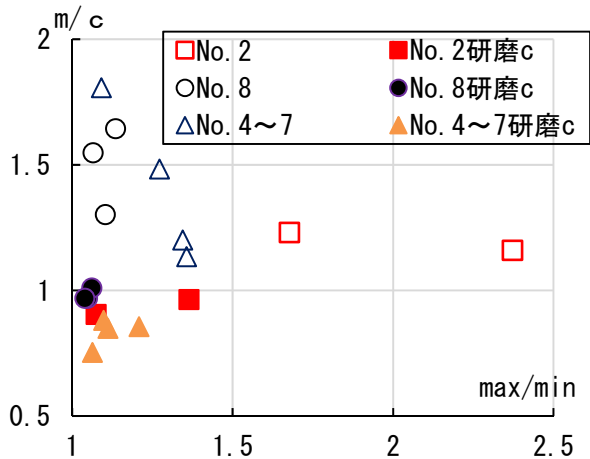


図5 シリーズ2の鋼板試験材表面の測定結果

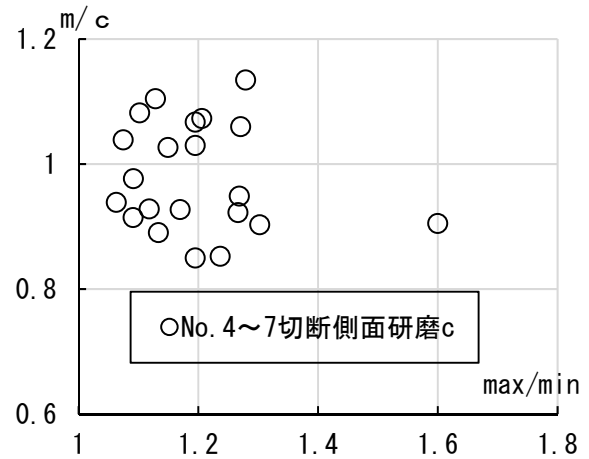


図6 シリーズ2の鋼板試験材側面の測定結果

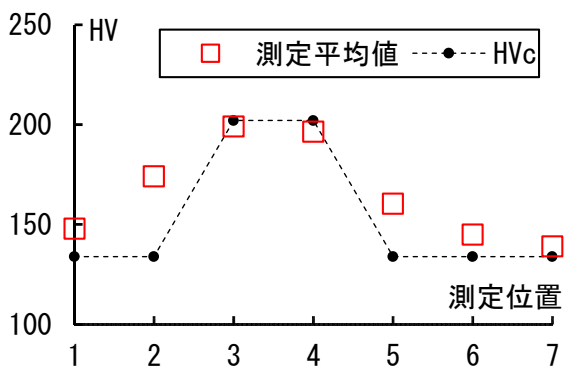


図7 シリーズ2の試験材 No.4 側面の測定結果

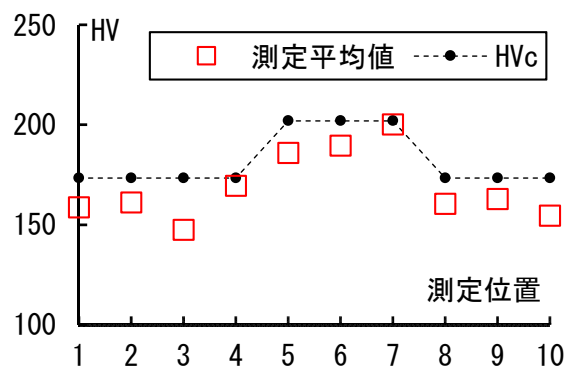


図8 シリーズ2の試験材 No.5 側面の測定結果

定結果を示す。なお、溶接部領域は試験材の設計開先形状から推定しており、溶接部の HVC は全溶着金属の素材試験結果から(1)式により算定した。図7、8を見ると、SS400 材では、母材の測定平均値は HVC を上回る傾向にあるが、SN490A は下回る傾向にあり、試験材 No. 6、7 も同様な傾向にあった。図6はこの結果によるものであるが、 $m/c$  の分布は  $1 \pm 0.15$  程度の範囲である。図7、8より、溶接部の最大硬さは本報告の範囲では HVC と対応しており、図9に示すように表面の研磨から得られた測定値に比べて、高い値となっている。

## 5. まとめ

既存建物の現地調査における携帯型成分分析計と硬さ計の使用法を目的に実施した本報告結果は、下記のようにまとめられる。

- 1) 両機器共に測定材料への研磨が必要で、同一材料への複数回の測定結果を評価するのが望ましい。
- 2) 成分分析計は、成分量の多い合金元素では20～30秒程度の測定時間で、測定誤差は10%未満となる。
- 3) 硬さ計による複数回の測定平均値から、測定材料の引張強さが推定可能であるが、実溶接部の測定で

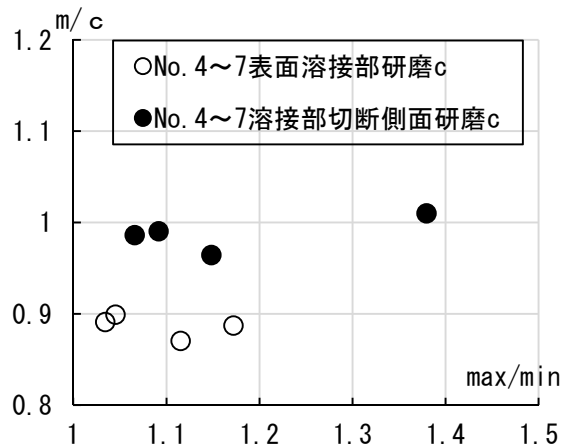


図9 シリーズ2の完全溶け込み溶接部の測定結果

は切断不能なため、今後の課題が残されている。

## 参考文献

- (1) 例えば、日本建築学会：昭和56年豪雪被害調査報告、1981.12

**謝辞：**本報告の測定の多くは、庄司皓之介氏(日本ケーブル(株))、村上峰氏(戸田建設(株))、中島翔太氏((株)守谷商会)が卒業論文で実施したものであり、ここに、各氏に謝意を表します。